Aus der Universitäts-Klinik für Hals-, Nasen- und Ohrenkranke
Basel
Vorsteher: Prof. Dr. E. Lüscher

Hörfähigkeit bei vermindertem Luftdruck

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde
der medizinischen Fakultät der Universität
Basel

Vorgelegt von
HANS STAMPFLI
Arzt
aus Kriegstetten
Solothurn

1942
Buchdruckerei Werner Habegger
Derendingen

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41546712_0058

Aus der Universitäts-Klinik für Hals-, Nasen- und Ohrenkranke
Basel
Vorsteher: Prof. Dr. E. Lüscher

Hörfähigkeit bei vermindertem Luftdruck

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde
der medizinischen Fakultät der Universität
Basel

Vorgelegt von
HANS STAMPFLI
Arzt
aus Kriegstetten
Solothurn

1942
Buchdruckerei Werner Habegger
Derendingen

Von der medizinischen Fakultät Basel genehmigt auf Antrag von

Prof. Erhard Lüscher

Promotion am 25. Februar 1942

I. Einleitung.

Die folgende Arbeit ist ein Beitrag zur Abklärung der Frage der Hörschärfe bei abnehmendem Luftdruck. Die Bearbeitung dieses Problems deckt eine verwirrende Menge von physikalischen und physiologischen Teilfragen auf, die z. T. schon geklärt sind, z. T. aber noch der Lösung harren.

Ausgehend von der dem Otologen schon lange bekannten Tatsache, daß bei Schädigung des Innenohrs durch chemische Substanzen oder Krankheitsgifte, sowie durch übermässigen Schall zuerst die hohen Töne ausfallen, wurde bis jetzt vor allem das Verhalten der oberen Tongrenze untersucht. Man erwartete dabei, daß als Ausdruck einer fortschreitenden Beeinträchtigung der sensorischen Funktionen durch Sauerstoffmangel die obere Tongrenze fortschreitend absinke.

Hartmann H. hat in seiner im Jahre 1936 in der Luftfahrtsmedizin erschienenen Arbeit „Die obere Hörgrenze bei Sauerstoffmangel" zur Erforschung dieser Frage Monochordversuche in der Unterdruckkammer angestellt. Er benützte absichtlich nur die Knochenleitung, da einerseits die Funktionen des Mittelohrs durch Druckänderung beeinträchtigt, und andererseits die Schalleitung in der Luft mit sinkendem Barometerdruck verschlechtert werde. Zuerst wurde jeweils eine Messung der oberen Tongrenze bei Normaldruck (Meereshöhe) ausgeführt und anschließend fanden Bestimmungen bei 5000, 6000, 7000 und 8000 m statt. Dem gestellten Problem folgend wurden dabei nur die obersten Tonfrequenzen im Bereiche von 17000 bis 21000 Hz berücksichtigt. Dabei fand

der Untersucher von 5000 m Höhe an einen deutlichen Abfall der oberen Tongrenze, der in größeren Höhen noch ausgesprochener wurde. In Uebereinstimmung mit andern, ältern Untersuchungen ging nun Hartmann der Ursache dieser Erscheinung nach und fand sie in allen Fällen als auf Sauerstoffmangel beruhend. Nach einigen Minuten 02-Atmung war die Wahrnehmbarkeit höherer Töne genau so gut wie in Meereshöhe.

In einer weiter unten angeführten, unveröffentlichten Arbeit des Zürcher Physiologischen Institutes konnte in der Unterdruckkammer bei 4500 m Höhe keine Veränderung der oberen Tongrenze bei Luftleitung mit dem Monochord festgestellt werden. Auch die untere Tongrenze, die mit den tiefsten Stimmgabeln bestimmt wurde, zeigte keine Verschiebung. Dieses Ergebnis stimmt mit den Hartmann'schen Resultaten überein, der erst von 5000—6000 m an ein Absinken der oberen Tongrenze fand. Es bezieht sich allerdings auf die Luftleitung, während von Hartmann die Knochenleitung untersucht wurde.

Der beobachtete Abfall der oberen Tongrenze ordnet sich nach Hartmann sinngemäß in die Gesamterscheinungen der Höhenkrankheit, die im wesentlichen auf Sauerstoffmangel zurückzuführen ist. Sie ist begleitet von einer Beeinträchtigung der Sinnesorgane, deren Leistung in der Höhe auch früher schon verschiedentlich untersucht und beschrieben wurde. Loewy gibt in seiner Monographie „Physiologie des Höhenklimas" eine Zusammenstellung der Beobachtungen über das Nachlassen des Seh- und Hörvermögens, des Geschmack- und Geruchsinnes wieder. Dazu ist allerdings einschränkend zu bemerken, daß die Höhenwirkung keineswegs ohne weiteres der Luftdrucksenkung in der Unterdruckkammer gleichgesetzt werden darf.

Wie Hartmann wiesen auch die Autoren Spiesman und Irwin G. im Jahre 1936 auf die Bedeutung des Sauerstoffs für eine normale Hörfunktion hin. Sie benützten allerdings für ihre Versuche nicht die Unterdruckkammer, sondern verschie-

denartig zusammengesetzte Luftgemische. An trainierten Versuchspersonen studierten sie den Einfluß von 02-Mangel und Schwankungen im CO2-Gehalt der Einatmungsluft auf die Reizschwelle der Hörwahrnehmungen, auf die Latenzzeit von negativen Nachbildern und auf den kalorischen Nystagmus. Für ihre Hörprüfungen benützten sie ein Westinghouse-Audiometer, ob mit Luft- oder Knochenleitung ist aus dem Referat des Vortrages nicht zu ersehen. Bei ihren Untersuchungen stellte sich heraus, daß mit Abnahme des 02-Gehaltes auf 10 % und weniger eine rasche Verminderung der Hörfähigkeit überhaupt eintritt; über die obere Hörgrenze werden keine näheren Angaben gemacht. Sowie der Sauerstoffgehalt der eingeatmeten Luft wieder steigt, wird auch die normale Reizschwelle wieder erreicht. Nur bei stark sinkendem 02-Gehalt dauert die Nachwirkung länger an. Der Vollständigkeit halber sei noch erwähnt, daß von diesen Autoren ganz ähnliche Veränderungen auch bei erhöhter Kohlendioxydkonzentration in der Einatmungsluft beobachtet wurden, aber auch bei Kohlendioxydmangel im Blut, welcher mit Hilfe einer starken Hyperventilation herbeigeführt wurde.

Hartmann benützte für seine Versuche in der Unterdruckkammer ausschließlich die Knochenleitung. Bei Verwendung der Luftleitung in der verdünnten Luft großer Höhen kommen nun das physikalisch-akustische Problem der Schallübertragung in einem weniger dichten Gas, sowie mechanische Wirkungen der Druckänderung hinzu.

In einer unveröffentlichten Arbeit des Zürcher Physiologischen Instituts vom Jahre 1938[1]) werden Luftleitungshörversuche mit Stimmgabeln — verwandt wurden Gabeln von G bis c5 — in der Unterdruckkammer beschrieben. Der Untersuchende wirft die Frage auf, ob und wie sich die Wahrnehmung von Schallwellen durch das menschliche Ohr ändert

[1]) Herrn Prof. W. R. Heß, der uns in liebenswürdiger Weise die Unterdruckkammer seines Instituts und auch diese unveröffentlichte Arbeit zur Verfügung gestellt hat, sprechen wir unsern herzlichen Dank für sein Entgegenkommen aus.

bei Veränderung des Luftdrucks. Aus den physikalischen Voraussetzungen und Ueberlegungen ergibt sich theoretisch die Forderung, daß in Medien von verschiedener Dichte eine gleiche, konstante Schallquelle nicht in gleicher Art wahrgenommen wird. Bei abnehmender Dichte des Mediums und im übrigen gleichen Bedingungen sollte die Schallwahrnehmung schlechter werden. Das Stimmgabelexperiment hat zwar diese Annahme nicht bestätigt, aber doch zugleich die Erklärung für das abwegige Verhalten gebracht.

In der Unterdruckkammer erhielt die Versuchsperson von Anfang an Sauerstoff, um die Veränderungen der Wahrnehmungsbereitschaft des Innenohrs und des zentralen Nervensystems infolge der allgemeinen Anoxaemie auszuschalten und dadurch ein genaueres Bild der Schalleitung zu erhalten. Durch eine spezielle Vorrichtung wurde ein gleichmäßiger Anschlag der Stimmgabel gewährleistet und dann vor dem Ohr in konstanter Entfernung ihre Abklingdauer bestimmt und kurvenmäßig in der Art aufgezeichnet, daß auf der Abszisse die Oktaven und der Ordinate die Zeit in Minuten eingetragen wurde.

Dabei stellte sich überraschend heraus, daß die Kurven bei Normaldruck (Höhe Zürich) ein auffallend gleiches Bild darboten wie diejenigen bei verdünnter Luft. Anscheinend konnte von einer Abnahme der Schallübertragung mit Abnahme des Druckes nicht die Rede sein, entgegen der Voraussetzung auf Grund physikalischer Ueberlegungen.

Zur Abklärung dieses Ergebnisses wurde das Verhalten der Stimmgabel unter vermindertem Luftdruck genau untersucht. Mit Hilfe eines Photokymographions wurde das Abklingen der Stimmgabel bei verschiedenen Drucken im Bilde festgehalten. Die erhaltenen Kurven zeigen deutlich, daß bei abnehmendem Druck das Dekrement der Stimmgabel ebenfalls um ein Bedeutendes abnimmt. Je geringer die Dichte des energieempfangenden Schwingungsmediums ist, desto größer also nach einer gegebenen Zeit die Schwingungsamplitude.

Zur Erklärung der bei verschiedenen Luftdichten praktisch nicht veränderten Abklingdauer ergibt sich also Folgendes: Das Dekrement der Stimmgabel ist von der Dichte des Schwingungsmediums in hohem Grade abhängig. Im Augenblick, da die Wahrnehmung des Tones aufhört, ist noch eine umso größere Schwingungsamplitude vorhanden, je geringer der umgebende Luftdruck ist. Es sind also zur Erwekkung der gleichen subjektiven Wahrnehmungen, im speziellen Fall der Hörgrenze, bei vermindertem Luftdruck erhöhte Amplituden notwendig, was mit den physikalischen Ueberlegungen wieder völlig übereinstimmt.

In geringerem Umfang wurden auch noch Versuche mit einem elektrischen Tonsender in Form eines improvisierten Telephons durchgeführt; ein Audiometer stand nicht zur Verfügung. Trotz der technischen Schwierigkeiten, die sich dabei herausstellten, kam man zum Wahrscheinlichkeitsresultat, daß bei niederem Luftdruck eine größere Stromstärke zur Erzeugung eines hörbaren Tones erforderlich sei als bei Normaldruck. Unsere eigenen Untersuchungen haben diesen letzteren Befund nicht bestätigen können, wie aus dem Folgenden hervorgeht.

In der letzten Zeit ist die unsere Frage und ihre Grenzgebiete betreffende Literatur des großen Interesses wegen, das ihr in der Physiologie des Fliegens zukommt, stark im Ansteigen begriffen.

Casella und die beiden japanischen Autoren Huzisawa und Toyoshima wiesen an Hand ihrer Beobachtungen an Piloten und nach Versuchen in der pneumatischen Kammer vor allem auf die Bedeutung der Tubenfunktion hin, ohne sich über das Verhalten des Gehörs sonst auszusprechen.

Zahlreiche andere Untersuchungen bei erniedrigtem Luftdruck beschäftigten sich mit der Vestibularfunktion. Hirano beobachtete beim Kaninchen in der Unterdruckkammer eine Verlängerung des Drehnystagmus und schloß daraus auf eine Verstärkung der Vestibulariserregbarkeit. Puchal'skij untersuchte in einer Höhe von 5000—6000 m ohne Sauerstoffzu-

fuhr die Chronaxie der Vestibularisfunktion und fand eine deutliche Verlängerung. Nach Kawana soll aber der Drehnystagmus in einer Höhe von 6000 m nicht verändert sein. Der kalorische Nystagmus wurde von Kisil'stein nachgeprüft, der in einer Höhe von 5000—5500 m eine deutliche Verkürzung der Latenzzeit und eine längere Dauer beobachtete. Von diesem Autoren wurden auch noch ergänzende Hörversuche mittels Stimmgabeln durchgeführt, wobei keine Abweichung von der Norm zum Vorschein kam. Auch Popow fand keine sicheren Anhaltspunkte für eine Korrelation zwischen Hörschärfe im Sinne einer Herabsetzung des Gehörs und der Sauerstoffverarmung des Blutes. Die genaueren Untersuchungsbedingungen sind in dem Referat nicht ersichtlich.

Wie aus dem vorausgehenden Literaturüberblick hervorgeht, ist allerdings das Hör- und Vestibularorgan in der Unterdruckkammer schon mehrfach untersucht worden, doch wurden bis jetzt genaue quantitative Hörmessungen mit dem Audiometer bei vermindertem Luftdruck noch nicht angestellt. Die Schwierigkeiten bei der Verwendung von Stimmgabeln wurden bereits erörtert und auch das Monochord hat sich nach den Audiometerbestimmungen für genaue Hörprüfungen als untauglich erwiesen. Letzteres geht schon daraus hervor, daß z. B. die von Hartmann mit dem Monochord festgestellte obere Tongrenze zwischen 17000 und 21000 Hz gegenüber den Messungen mit dem Audiometer bedeutend zu hoch liegt. Eine Nachkontrolle und Erweiterung der vorliegenden Resultate schien uns deshalb angezeigt.

II. Eigene Untersuchungen.

A. Methodik der Versuche.

Unsere Untersuchungen wurden in der Unterdruckkammer des physiologischen Instituts in Zürich (Prof. W. R. Heß) angestellt und zur Hörprüfung die Audiometrie herangezogen.

Wir benutzten für unsere Hörprüfungen das Marconi-Ekco-Audiometer, eines der üblichen elektro-akustischen Hörprüfungsgeräte, deren Prinzip wir als bekannt voraussetzen. Ein Audiometer mit der oberen Tongrenze stand uns leider nicht zur Verfügung. Der Tonbereich unseres Apparates erstreckt sich von C mit 64 Schwingungen bis zur 6 gestrichenen Oktave mit einer Frequenz von rund 8200 Hz. Für unsere Versuche erwuchs aus dem Fehlen der höheren Frequenzen von 8200 Hz an aufwärts der Nachteil, daß wir die wichtige obere Tongrenze nicht nachprüfen konnten.

Bei der Hörprüfung hielten wir uns an die allgemein übliche Schwellenwertmessung und erhielten auf diese Weise für jede Untersuchung eine Schwellenwertkurve. Wie in den nachfolgenden Abbildungen zu sehen ist, sind die Tonfrequenzen auf der Abszisse in Oktaven, bzw. Schwingungsfrequenzen (Hertz, Hz) eingetragen, der Hörverlust ist auf der Ordinate in Decibels angegeben. Die Normalwerte werden durch die Nullabszisse dargestellt. Diese Nullinie wurde aber auch vom normalen Ohr nicht erreicht, sondern liegt selbst unter den gewöhnlichen äußeren Bedingungen ca. 20 Decibels darunter; mit dem Alter sinkt die Kurve in den obern Tonbereichen ab.

In den Einzelversuchen verläuft die Schwellenwertkurve zudem nicht als Gerade, sondern zeigt erhebliche individuelle Schwankungen nach unten und oben, die auch bei sog. Normalhörenden in bestimmten Frequenzen zu erheblichen Tonsenken führen können. Eine scharfe Grenze zur Schwerhörigkeit läßt sich nicht ziehen. Auffällig gering sind dagegen die zeitlichen Schwankungen beim selben Menschen, wenigstens innerhalb kurzer Zeiträume, die zusammen mit den Meßfehlern 5—10 Decibel nur in Ausnahmefällen überschreiten. Die Audiometrie ist eine entsprechend genaue und zuverlässige Meßmethode und in dieser Hinsicht den Stimmgabelprüfungen und auch den Untersuchungen mit dem Monochord, wie sie Hartmann angewendet hat, weit überlegen.

Bei der Betrachtung der Hörkurven verschiedener Versuchspersonen zeigt sich sowohl für Luft-, wie für Knochen-

leitung eine in ihrer Gesamtheit charakteristische individuelle Form, die meistens für beide Ohren symmetrisch verläuft. Nach dem Symmetriegesetz von Langenbeck gilt dasselbe für konstitutionelle Schwerhörigkeiten. Es ist kein Zweifel, daß auch beim Normalhörenden vererbbare konstitutionelle Faktoren zu dieser charakteristischen individuellen Hörkurve füh-

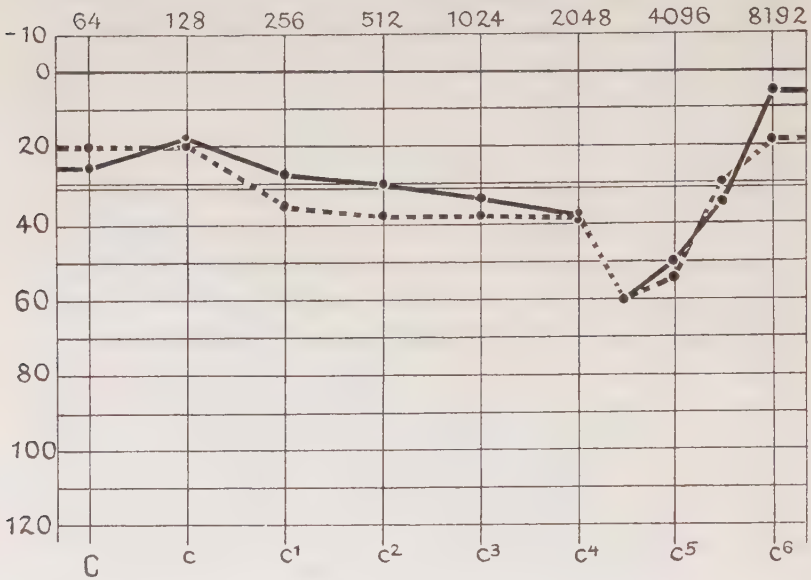

Abb. 1: Beiderseits annähernd symmetrisch verlaufende Schwellenwertkurve bei Knochenleitung mit individuell charakteristischen Tongipfeln und Tonsenken. (B. H., 22-jähriger Mann) ——— rechtes Ohr, - - - - linkes Ohr.

ren (Waetzmann u. a.). Abb. 1 ist ein schönes Beispiel für diesen symmetrischen Verlauf der Knochenleitungskurve beider Ohren.

Die folgende Kurve (Abb. 2) enthält die Durchschnittswerte von 12 Hörversuchen beim „Normalhörenden". Die Kurve nähert sich der Durchschnittsgeraden und hat die individuellen Schwankungen größtenteils verloren. Das Absinken im Bereiche von c_3 und c_1 fanden wir bei unsern Versuchen

immer wieder und bringen es mit der Konstruktion des verwendeten Apparates in Zusammenhang. In den ersten Versuchen festgestellte, übermäßige Schwankungen der Kurve in den obern Tonbereichen waren auf mangelnde Abdichtung des Tongenerators zurückzuführen. Durch Entfernen des Apparates aus dem Hörbereich der Versuchsperson konnte diese

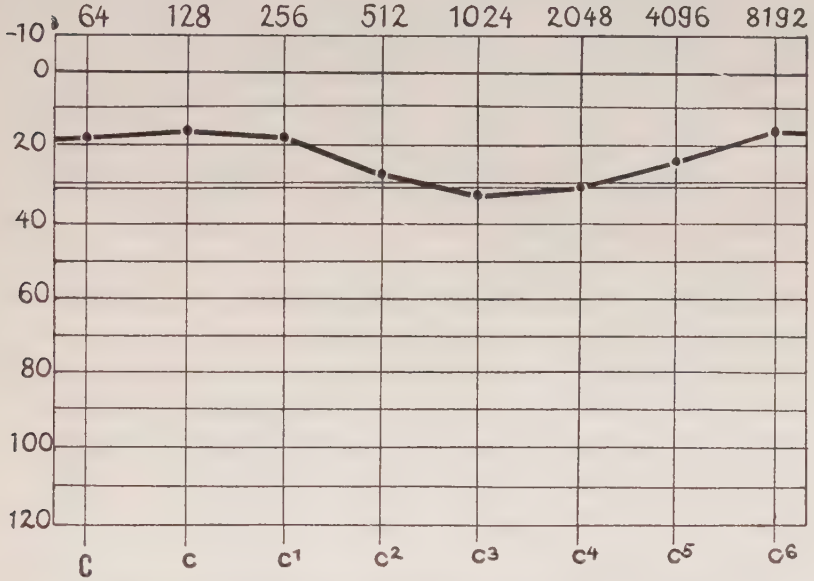

Abb. 2: Durchschnittskurve der Luftleitung von 12 Normalhörenden bei Normaldruck.

Fehlerquelle vollständig behoben werden, und der die Resultate verfälschende Verlauf der Kurve blieb von da an aus.

Um Meßfehler möglichst auszuschalten, wurden bei der Aufnahme der Kurven aufeinanderfolgend für jede Tonstufe mehrere Bestimmungen des Schwellenwertes vorgenommen und der Durchschnitt davon verwendet. Dabei wurde mit Hilfe des entsprechend eingerichteten Apparates ein unterschwelliger Ton allmählich bis er hörbar wurde verstärkt, und dann in umgekehrter Weise so weit wieder abgeschwächt, bis er für die Versuchsperson nicht mehr wahrnehmbar war.

Nach mehreren Prüfungen ergab sich auf diese Weise der durchschnittliche Schwellenwert.

Die Verständigung bei der Hörprüfung erfolgte einzig und allein durch ein optisches Lichtsignal. Der Untersucher bediente dabei außerhalb der Unterdruckkammer das Audiometer und war mit dem hermetisch abgeschlossenen Innern nur durch elektrische Kabel verbunden. So waren nicht nur störende Geräusche weitgehend ausgeschaltet, sondern auch jede psychologisch-suggestive Beeinflussung ausgeschlossen.

Die Hörkurve wurde zuerst bei normalem Barometerstand, der in Zürich (412 m über Meer) einem Durchschnittswert von ca. 720 mm Hg entspricht, und anschließend bei künstlich stark herabgesetztem Luftdruck aufgenommen. Nach Bestimmung der Hörkurve auf Höhe Zürich erfolgte nun der Aufstieg in der Unterdruckkammer. Mit einer Geschwindigkeit von 500 m/Min. wurde durch Herabsetzung des Luftdrucks die notwendige Höhe erreicht. Wir hielten uns dabei nicht an eine willkürlich festgesetzte Grenze, sondern variierten innerhalb bestimmter, immer wieder gleich gewählter Höhengrenzen je nach Veranlagung und Widerstandfähigkeit der Versuchsperson. Für die Wahl der Höhe achteten wir vor allem auf die ersten Zeichen des beginnenden Sauerstoffmangels, wie Mattigkeit, Gefühl müder Schwere in den Gliedern und im Kopf begleitet von Gähnen, Schwarzwerden vor den Augen, Unfähigkeit sich zu konzentrieren und selbst unbedeutende Bewegungen auszuführen. Parallel damit beobachteten wir Erscheinungen, die wohl lediglich auf Verminderung des Luftdruckes zurückzuführen sind, wie Druck auf der Brust und in der Magengegend, Aufgetriebensein, Blutandrang zur Körperoberfläche und vor allem in die Augen und zum Kopf. Im Allgemeinen trieben wir die Versuche nicht weiter. Sobald sich der Sauerstoffmangel durch noch stärkere Beschwerden bemerkbar machte, waren bei der Hörprüfung die Angaben so ungenau und schwankend, daß sie sich überhaupt nicht mehr verwerten ließen. So wurden Versuche bei 4000, 5000 und 6000 m durchgeführt. Keine der Versuchspersonen

war in der Lage in noch größerer Höhe verläßliche Angaben zu machen. Die Höhenzahlen wurden nach den Werten der internationalen Normalatmosphäre aus dem Barometerdruck umgerechnet.

Beim Aufstieg in der Unterdruckkammer wurde auf häufiges Schlucken geachtet, um möglichst jede Druckschwankung in der Paukenhöhle durch Oeffnen der Tube auszugleichen. Um für die Mittelohrfunktion eine gewisse Kontrolle zu besitzen und eventuelle Störungen ausschließen zu können, wurde vor und nach jedem Unterdruckkammerversuch der Trommelfellbefund notiert, der verschiedentlich die Erklärung für unerwartete Abweichungen der Hörkurve brachte.

B. Ergebnis der Versuche.

Unsere Unterdruckkammerversuche wurden an 22 normalhörenden Versuchspersonen mit normalem otoskopischem Befund vorgenommen und umfassen im ganzen 56 Schwellenwertkurven. Wir können sie in zwei Gruppen einteilen:

1. Hörprüfung mittels Knochenleitung.
2. Hörprüfung mittels Luftleitung.

1. Knochenleitung.

Diese Gruppe nimmt den größten Teil unserer Versuche ein und läßt sich unterteilen in solche bei

a) offenem Gehörgang und
b) geschlossenem Gehörgang.

Die Knochenleitung ist deshalb wichtig, weil sich bei ihr das Mittelohr, wenn auch nicht vollständig, so doch zum großen Teil ausschalten läßt. Deshalb dürfen wir mit Hartmann annehmen, daß der physikalische Einfluß der Luftdrucksenkung

---

Aus Gründen der Platzersparnis können wir nur einen kleinen Teil der Hörkurven veröffentlichen. Die gesamten Untersuchungsergebnisse stehen zur Verfügung.

auf die Schalleitung jedenfalls geringer ist als bei Luftleitung. Die abgeleiteten Ergebnisse lassen deshalb vor allem den physiologischen Einfluß der Anoxaemie bei der Luftdrucksenkung auf das Innenohr bzw. die Hörempfindung beurteilen.

a) Knochenleitung bei offenem Meatus.

An neun gesunden, normal hörenden Versuchspersonen wurde zuerst in der oben beschriebenen Weise die Hör-

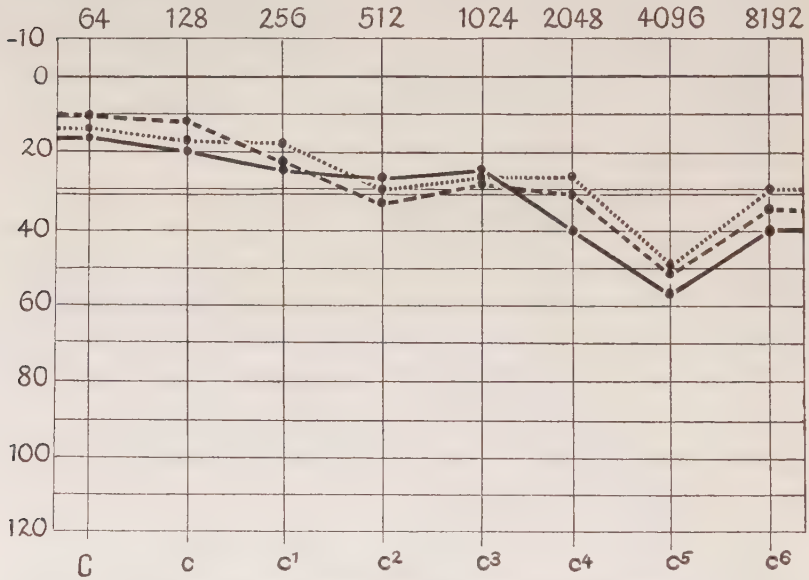

Abb. 3: Knochenleitungskurven bei offenem Gehörgang (St. O., 31-jähriger Mann, li. Ohr) ——— Zürcher Höhe, ... 4000 m, - - - - 6000 m.

kurve bei Normaldruck, anschließend in der Unterdruckkammer bei herabgesetztem Druck aufgenommen. Neben den Messungen in einer Höhe von teils 4000 m, teils 5000 m wurde bei 4 Personen noch eine weitere Messung in 6000 m ausgeführt. Bei der getrennten Untersuchung beider Ohren erhielten wir so 26 Hörkurven bei herabgesetztem Luftdruck.

Nach den in der Literatur beschriebenen Untersuchungen

mußten wir eine wesentliche Veränderung der Gehörfunktion bei einer solchen Senkung des Luftdrucks erwarten. Umso erstaunlicher war für uns die Gleichförmigkeit und das Uebereinstimmen der Kurven bei Normaldruck und dem verminderten Druck in großer Höhe. Zur Veranschaulichung mögen die Abb. 3 und 4 dienen. Bei dem 30-jährigen O. St. der Abb. 3 ist weder bei 4000 m, noch bei 6000 m eine wesentliche Verschiebung gegenüber der Kurve bei Normaldruck

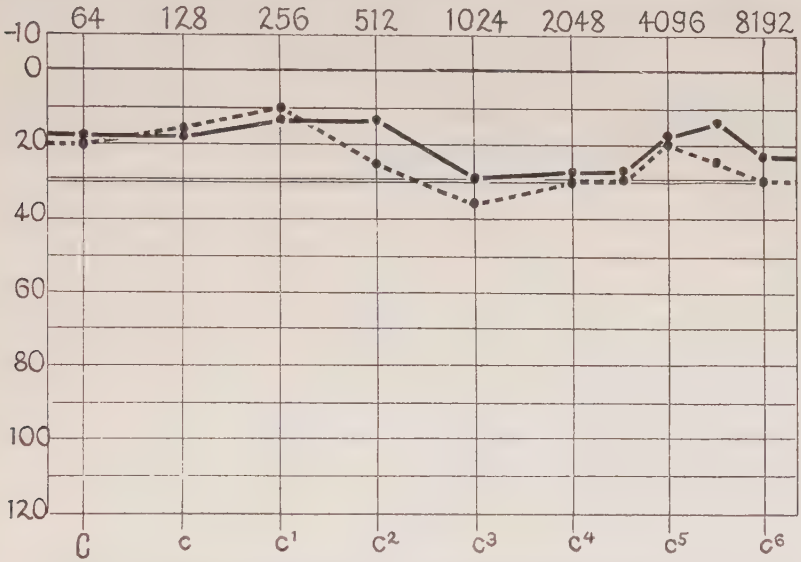

Abb. 4: Knochenleitungskurven bei offenem Gehörgang (Z. A., 34-jähriger Mann, re. Ohr). ——— Zürcher Höhe, ... 5000 m.

festzustellen, trotzdem bei 6000 m die Erscheinungen des Sauerstoffmangels sehr ausgeprägt waren und sich durch Flimmern und Schwarzwerden vor den Augen, Herzklopfen, allgemeine Schwere und Müdigkeit bemerkbar machten. Ganz analoges Verhalten zeigen die Kurven Z. A., 34-jähriger Mann, aufgenommen in der Höhe von 5000 m, da die sechstausender Grenze kaum ertragen wurde und die Angaben zu ungenau und schwankend waren, um verwertet werden zu können. In

geradezu verblüffender Weise ahmen die Schwellenwerte der letzteren Kurve im Bereiche von c_4 und c_5 die Schwankungen nach unten nach, trotzdem auch bei diesen Versuchen die Allgemeinerscheinungen des Sauerstoffmangels schon sehr deutlich vorhanden waren. Ebenso zeigen die beiden ersten Kurven, daß die typische individuelle Form der Hörkurve auch bei Luftdrucksenkung in allen Einzelheiten gewahrt bleibt.

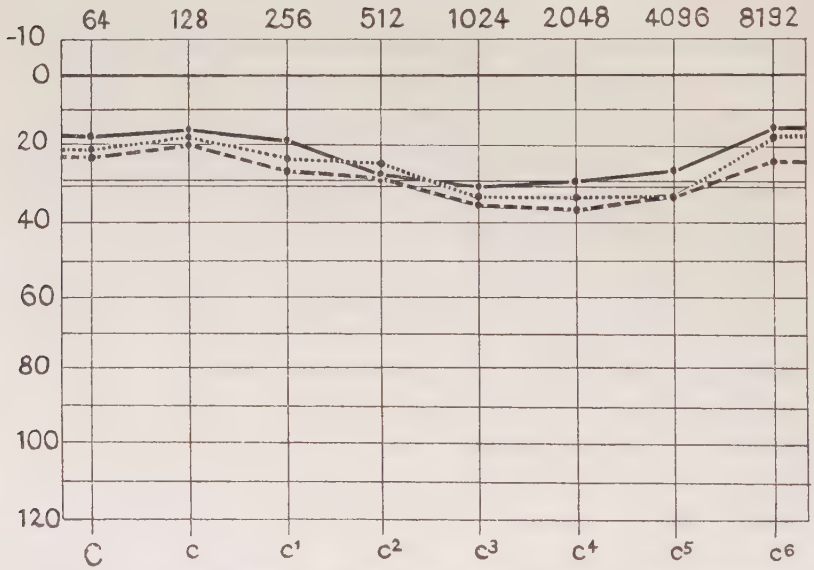

Abb. 5: Durchschnittskurve der Knochenleitung bei Luftdrucksenkung bei offenem Gehörgang. ——— Zürcher Höhe, ... 4000 m, - - - - 6000 m.

Einen Ueberblick über die einzelnen Versuche gibt die Durchschnittskurve in Abb. 5 aus sämtlichen Versuchen bei Zürcher Höhe und in 4000 m bzw. 6000 m. Nicht berücksichtigt wurde dabei die Grenze von 5000 m, da von dieser Höhe zu wenig Kurven vorliegen. Die Schwellenwertkurven bei Normaldruck, auf 4000 und 6000 m verlaufen innerhalb der Meßfehler identisch und eine wesentliche Beeinflussung der Hörfunktion durch die Luftdrucksenkung ist nicht zu erkennen.

Vor und nach jedem Unterdruckkammerversuch wurde, wie wir bereits oben erwähnt, otoskopiert, um nach der Belastungsprobe auch in dieser Richtung eine Kontrolle zu besitzen. Wir haben nur bei vereinzelten unserer Versuchspersonen nach Verlassen der Unterdruckkammer einen pathologischen Befund erheben können, der zudem im allgemeinen sehr geringgradig war: Leichte Injektion längs des Hammergriffs, selten auch eine unbedeutende Einziehung, die man

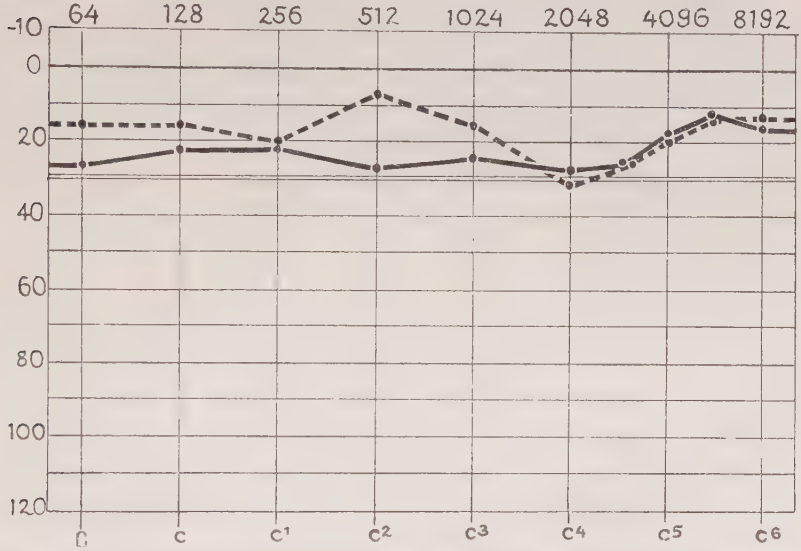

Abb. 6: Knochenleitungskurven bei offenem Gehörgang mit leichtem Tubenverschluß. (F. E., 27-jähriger Mann, re. Ohr). ——— Zürcher Höhe, ... 5000 m.

vor dem Versuch nicht bemerkt hatte. Doch treten diese Befunde an Zahl weit hinter jenen zurück, wo das Trommelfell auch nach Verlassen der Unterdruckkammer vollständig normale Verhältnisse aufwies und keine Klagen über Ohrdruck oder Ohrensausen vorgebracht wurden. In Abb. 6 sind die Kurven von F. E., 27jährig, wiedergegeben, der nach Beendigung des Versuchs über etwas Ohrensausen klagte und eine leichte Trommelfelleinziehung rechts darbot. Die Kurve

zeigt im untern Tonbereich des rechten Ohres einen leichten Ausschlag nach oben, also eine gewisse Verbesserung der Knochenleitung, wie man sie bei Mittelohrstörungen vorfindet. Wahrscheinlich ist ein leichter, unter der Luftdruckschwankung aufgetretener Tubenverschluß für diesen Befund verantwortlich zu machen. Wir werden später bei der Besprechung

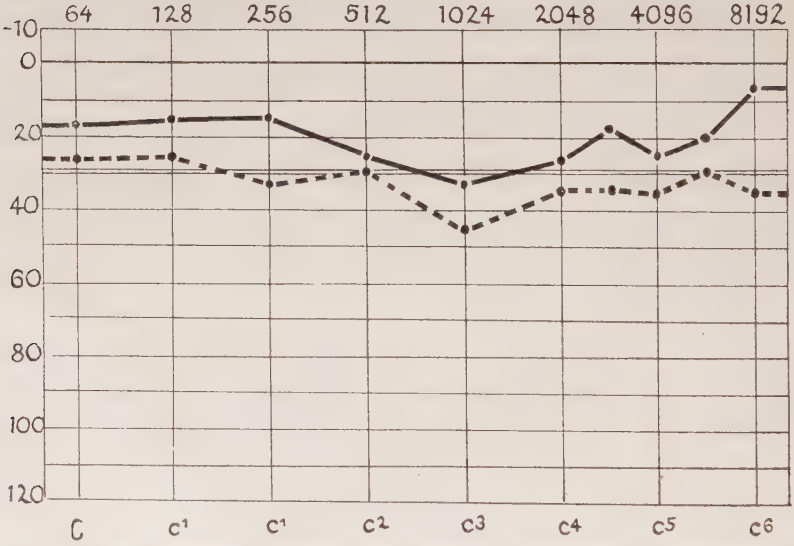

Abb. 7: Knochenleitungskurven bei offenem Gehörgang. „Atypischer" Hörverlust über die ganze Tonreihe bei 6000 m. (H. W., 21-jähriger Mann, re. Ohr). ——— Zürcher Höhe, ... 6000 m.

unserer Ergebnisse auf diese unter der Luftdrucksenkung auftretenden Mittelohrstörungen und ihre Bedeutung für die Knochenleitung zurückkommen.

Eine einzige Untersuchung fällt etwas aus dem Rahmen der gewöhnlichen Befunde. Es ist dies die Kurve von H. W., 21jährig (Abb. 7), bei der sich in der Höhe von 6000 m eine deutliche Verminderung der Tonempfindlichkeit findet, ohne daß otoskopisch etwas Pathologisches festzustellen war. Die Kurvensenkung erreicht aber auch hier nur geringe Ausmasse. Der Durchschnitt beträgt im Mittel nicht mehr als

15 Decibels und nur bei 8000 Hz findet sich ein Hörverlust von 30 Decibels. Der junge, intelligente Mann hatte heroisch auf dieser Höhe ausgehalten, trotzdem die Allgemeinerscheinungen sehr ausgesprochen waren. Er beschreibt mir nach Verlassen der Unterdruckkammer eindrücklich das Gefühl des Einschlafens, das ihn unwiderstehlich packte, und die stark verminderte Konzentrationsfähigkeit. Diese Angaben genügen, um den erhobenen Befund zu erklären.

b) Knochenleitung bei verschlossenem Meatus.

Bei verschlossenem Gehörgang ist die Hörfähigkeit auf dem Knochenwege bis zu ihrem Maximum gesteigert. Wie zu erwarten, liegen die Kurven dementsprechend alle etwas höher als bei den vorausgegangenen Versuchen, wenigstens was die niederen Frequenzen anbetrifft. Im obern Tonbereich ist gegenüber den schon beschriebenen Messungen kein Unterschied festzustellen.

Untersucht wurden bei dieser zweiten Versuchsreihe 7 Personen. Da es zufällig durchwegs sehr widerstandsfähige Leute waren, wurden alle Messungen bei 6000 m durchgeführt; zweimal ging noch eine Probe bei 4000 m voraus. Es versteht sich von selbst, daß der Meatus jeweils erst unmittelbar vor Beginn der Hörprüfung verschlossen wurde (Oropax) und der Auf- und Abstieg bei freiem Gehörgang stattfand.

Die auf diese Weise erhaltenen Schwellenwertkurven bieten bei Normaldruck und in der Höhe wieder jenen gleichartigen, sich fast deckenden Verlauf, wie er uns bereits in der ersten Versuchsreihe auffiel. Die Abb. 8 gibt die Durchschnittswerte aus sämtlichen Versuchen.

Wir kommen auch hier zum Schluß, daß die Herabsetzung des Luftdrucks die Hörfähigkeit nicht wesentlich beeinflußt. Dabei bleibt die Verbesserung der Knochenleitung durch den Gehörgangsverschluß auch bei Unterdruck in vollem Umfang bestehen.

Die Hörfähigkeit bei Knochenleitung mit offenem und geschlossenem Gehörgang erlei-

det demnach zwischen 64 und 8200 Hz durch eine Luftdrucksenkung von 720 mm auf 350 mm keine audiometrisch nachweisbare Verminderung. Die Schallempfindung ist innerhalb dieser Grenzen gegen Luftdruckschwankungen unempfindlich.

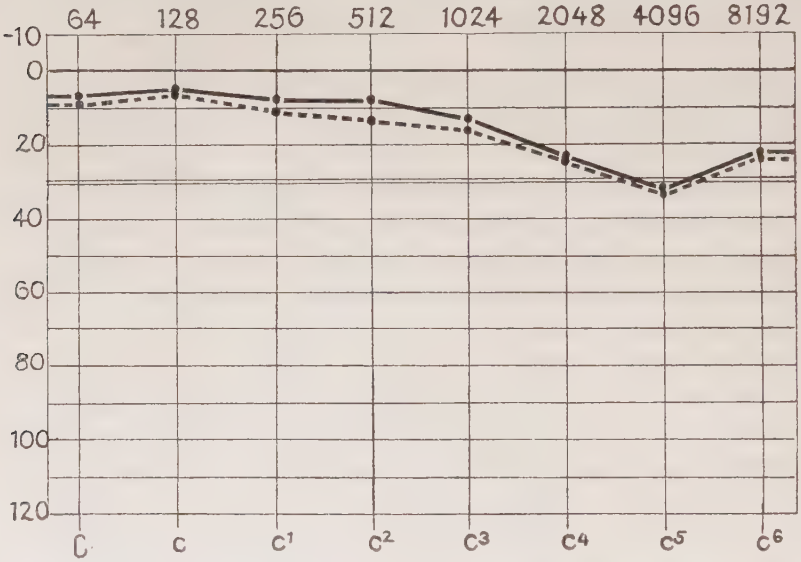

Abb. 8: Durchschnittskurve der Knochenleitung bei verschlossenem Gehörgang bei Luftdrucksenkung. ——— Zürcher Höhe, ... 6000 m.

2. Luftleitung.

In dieser Versuchsreihe beschäftigten wir uns mit der Schallübertragung durch die Luft. An Stelle des Knochentelephons wurde ein Kopfhörer verwendet, der der Ohrmuschel direkt angelegt wurde. Im übrigen war die Versuchsanordnung dieselbe, wie bei der Knochenleitung.

Wir führten alle Unterdruckkammerversuche, für die uns 6 Personen zur Verfügung standen, bei 4000 m aus. Nur in einem Fall wurde noch eine weitere Messung bei 6000 m

angeschlossen. So standen uns am Schluß 14 Hörkurven zur Verfügung.

Wir waren überrascht, bei der Großzahl der Untersuchungen auch hier keine Abweichungen der beiden verglichenen Kurven zu finden. Entgegen unseren Erwartungen kommt es also bei dieser Versuchsanlage auch bei der Schalleitung in der

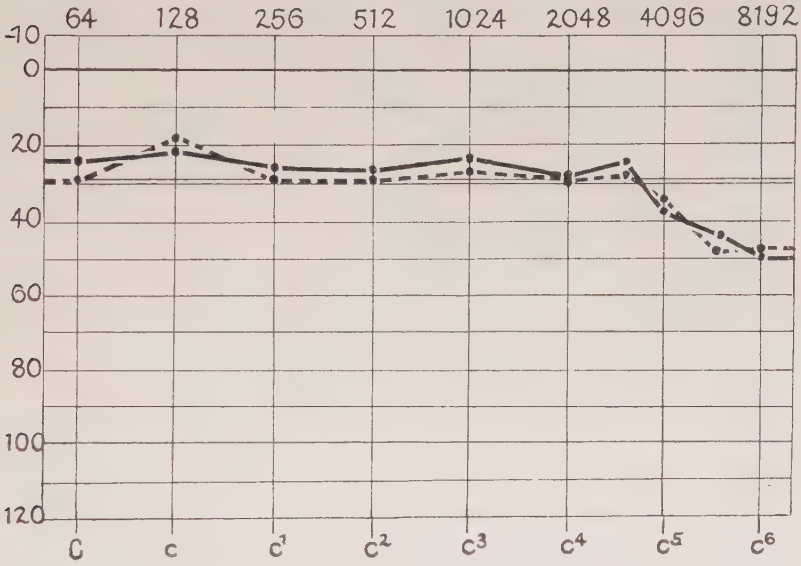

Abb. 9: Luftleitungskurven ——— Zürcher Höhe, ... 4000 m. (E. E., 28-jähriger Mann, re. Ohr).

verdünnten Luft zu keinem Hörverlust. Abb. 9 und 10 sind Beispiele dafür.

Im übrigen sind aber die Ergebnisse nicht so eindeutig wie in den bereits beschriebenen Versuchen. Die Abweichungen bestanden in einem Hörverlust von 20—30 Dezibels bei den tiefen und mittleren Frequenzen, während sich die beiden Kurven im höheren Tongebiet einander näherten oder trafen. Zudem war dieser Hörverlust meist nur einseitig, während das andere Ohr bei normalem und gesenktem Luftdruck praktisch dieselbe Kurve ergab. Schon daraus ließ sich auf eine Mittel-

ohrstörung bzw. eine ungenügende Tubenöffnung beim „Aufstieg" schließen, die zudem durch die ebenfalls nur einseitigen subjektiven Erscheinungen (Rauschen) und den otoskopischen Befund am Trommelfell meist bestätigt wurde. Es mag ein Zufall sein, daß sich in dieser Versuchreihe mehr derartige Fälle fanden als bei den übrigen, andererseits reagiert

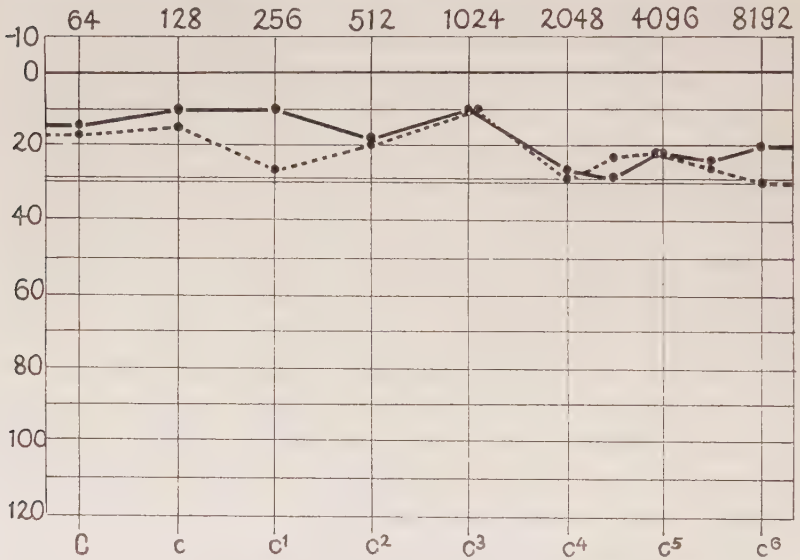

Abb. 10: B. E., 19-jähriger Jüngling, re. Ohr. Luftleitungskurven ——— Zürcher Höhe, ... 4000 m.

zweifellos die Luftleitung auf Mittelohrstörungen stärker als die Knochenleitung. Diese Kurven waren uns daneben ein Beweis mehr für die Zuverlässigkeit der Versuchsmethodik, die jede Abweichung von der Norm sofort aufzeigte und die von uns festgestellte Unabhängigkeit des Hörvermögens von der Höhe umso sicherer erscheinen ließ. So ergab sich bei der Hörprüfung von B. H. 20-jährig (Abb. 11) bei vermindertem Luftdruck in der Höhe rechts ein deutlich tieferer Verlauf als links, wobei vor allem die niederen Frequenzen betroffen waren. Die Versuchsperson gab spontan an, in der Unterdruckkammer im rechten Ohr ein unangenehmes Rauschen

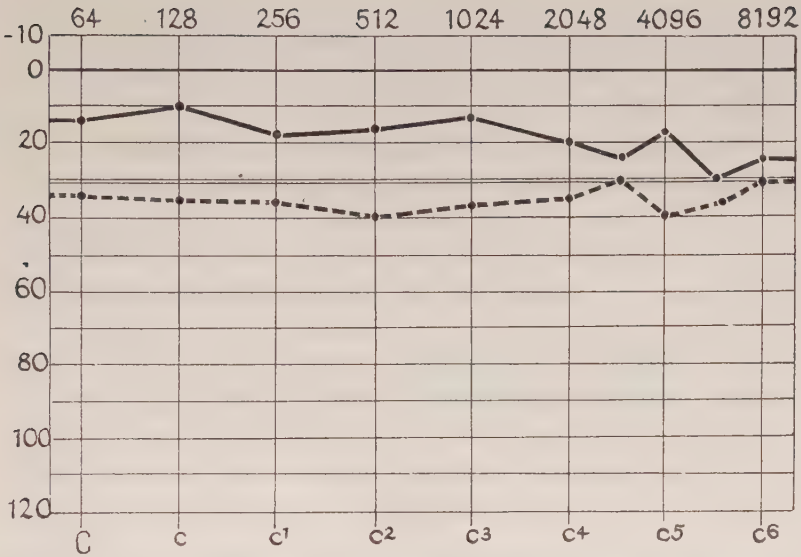

Abb. 11: B. H., 20-jähriger Mann, re. Ohr. Hörverlust bei Luftleitung in 4000 m. (Tubenverschluß). ——— Zürcher Höhe, - - - - 4000 m.

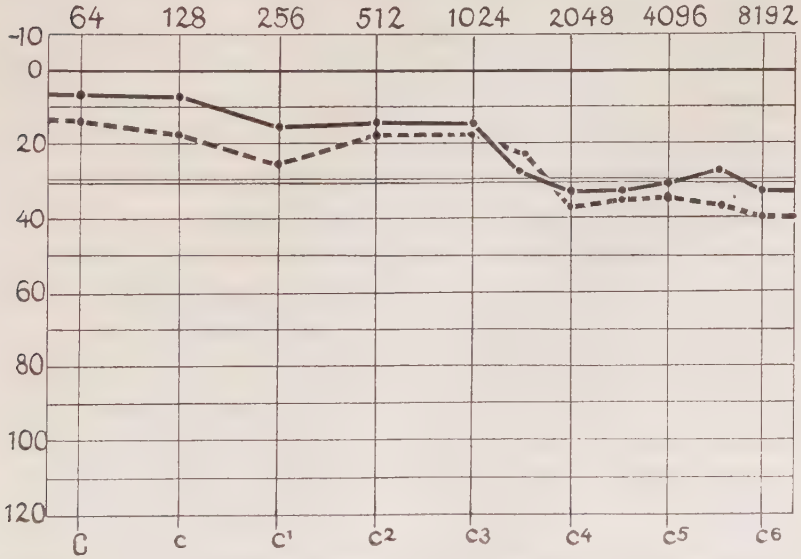

Abb. 12: B. H., 20-jähriger Mann, li. Ohr. Identische Luftleitungskurven in Zürcher Höhe (———) und in 4000 m (- - - -).

verspürt zu haben; die otoskopische Kontrolle zeigte eine leichte Einziehung rechts mit deutlicher Injektion längs des Hammergriffs. Auf der Gegenseite blieb die Kurve praktisch unverändert (Abb. 12).

Eine Abnahme der Hörfähigkeit mit sinkendem Luftdruck trat demnach auch bei diesen Luftleitungsversuchen nur bei

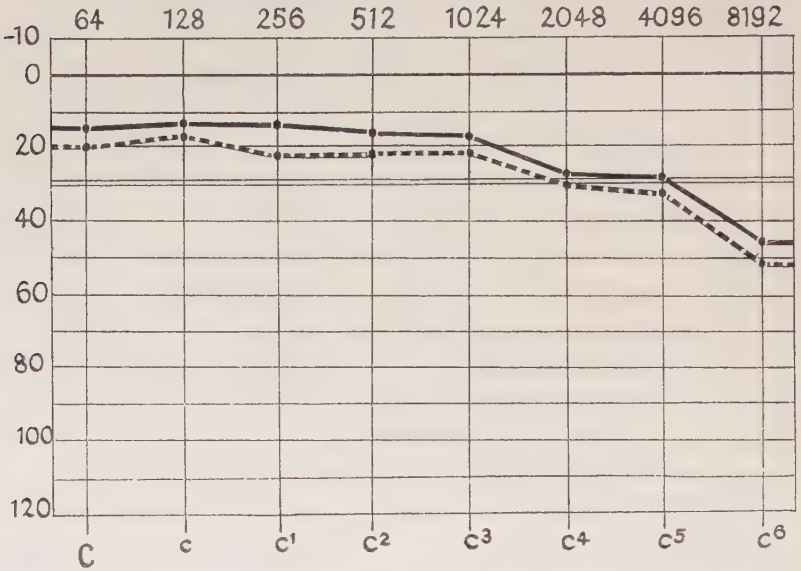

Abb. 13: Durchschnittskurve der Luftleitung bei Luftdrucksenkung. ——— Zürcher Höhe, - - - - 4000 bzw. 6000 m.

Mittelohrstörungen, bzw. bei gestörter Tubenlüftung ein, und betraf jeweilen nur das eine Ohr der Versuchsperson.

Dementsprechend ergibt die Durchschnittskurve (Abb. 13) aller nicht mittelohrgestörter Ohren auf Zürcher Höhe und auf 4000 m einen praktisch identischen Verlauf der Luftleitungskurve.

Auch bei Luftleitung konnte eine audiometrisch nachweisbare Höreinbuße bei einer Luftdrucksenkung auf annähernd die Hälfte des Normaldruckes nicht nachgewiesen werden.

Dieser Befund gilt zunächst nur für unsere Versuchsanordnung mit dem von uns verwendeten Kopfhörer. Eine Verallgemeinerung ist nicht ohne weiteres zulässig, da das physikalisch-akustische Verhalten des Telephons unter vermindertem Luftdruck von uns nicht direkt untersucht worden ist.

Besprechung.

Aus allen unsern Versuchen geht einwandfrei hervor, daß die Hörfähigkeit innerhalb der geprüften Frequenzen (64—8200 Hz) durch Luftdrucksenkung (720 mm bis 350 mm), die das zentrale Nervensystem bereits stark beeinflußt, nicht verändert wird. Der in allen Experimenten immer wieder beobachtete Verlauf der beiden aufgenommenen Kurven zeigt, daß das Ohr bei erniedrigtem Luftdruck seine Leistungsfähigkeit voll bewahrt. Lange noch, wenn bereits deutliche Zeichen zentraler Störung, wie u. a. Schlafsucht, mangelnde Konzentrationsfähigkeit vorhanden sind, weist das Hörvermögen seine ursprüngliche Feinheit auf.

Als einzige Abweichung beim Vergleich der beiden Hörprüfungen unter normalem Luftdruck und in der Höhe macht sich ein Ungenauerwerden der Angaben bemerkbar, d. h. eine Zunahme der Schwankungsbreite. Letztere nimmt in der Höhe deutlich zu, was nicht verwunderlich ist, wenn man bedenkt, wie sehr dieser Faktor von der Aufmerksamkeit und Konzentrationsfähigkeit, also von rein psychischen Faktoren abhängt. Das Mittel dieser Abweichungen nach oben und unten ergibt aber stets einen unverrückten Schwellenwert der Tonperzeption, der demjenigen bei normalem Luftdruck gleichkommt.

Die Hypoxaemie, die der von uns erreichten Maximalhöhe von 6000 m entspricht, geht aus den folgenden physiologischen Angaben hervor. Gegenüber einem Sauerstoffge-

halt von ca. 20 % in der umgebenden Luft beträgt der Sauerstoffgehalt der Alveolarluft, auf welchen es beim Gasaustausch einzig ankommt, nur 14,5 %. In der untenstehenden Tabelle findet sich unter Berücksichtigung dieser Zahlen eine Zusammenstellung von Höhe, Barometerstand, O_2-Teildruck in der Luft und in der Alveole.

Höhe	Barometerstand	Atmosphäre O_2-Teildruck	Alveolar O_2-Teildruck
450 m (Zür.)	720 mm Hg	144 mm Hg	105,1 mm Hg
4000 „	450 „ „	92 „ „	67,1 „ „
6000 „	350 „ „	70 „ „	51,1 „ „

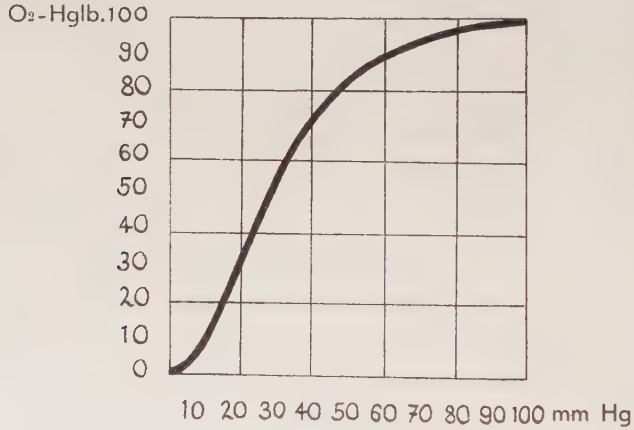

Abb. 14

Ein Luftgemisch mit einem Gehalt von 10 % Sauerstoff entspricht bei unserm Barometerstand einem O_2-Teildruck in der Atmosphäre von 72 mm Hg, was einem schätzungsweisen Alveolardruck von ca. 55 mm Hg gleichkommt. Aus untenstehender Kurve (Abb. 14), entnommen aus dem Lehrbuch der Physiologie von Landois, die die O_2-Sättigung bei verchiedenen Drucken wiedergibt, sieht man, daß bei 67 mm Hg ca. 90 %, bei 50 mm Hg ca. 82 % des Haemoglobins mit Sauerstoff gesättigt sind, was schon eine starke, mit bedeutenden Sauerstoffmangelerscheinungen einhergehende Verminderung bedeutet.

Bei der von uns erreichten Maximalhöhe war demnach noch eine Sauerstoffsättigung des Blutes von 82 % zu erwarten, die bereits zu bedeutenden Sauerstoffmangelerscheinungen von Seiten des Zentralnervensystems führte, aber noch keine Beeinträchtigung der Hörfähigkeit mit sich brachte.

Es erhebt sich hier die Frage, wie sich andere Sinnesorgane gegenüber der Luftdrucksenkung verhalten. Die Vestibularisfunktion bildete schon einleitend Gegenstand einer kurzen Betrachtung. Die erwähnten Untersuchungen (Hirano, Puchal'skij, Kawana, Kisil'stein) deuten wohl auf eine gewisse Beeinflussung hin, doch sind die Angaben wie wir gesehen haben nicht eindeutig.

Die verschiedenen Funktionen des Auges wurden ebenfalls vielfach untersucht und die Ergebnisse zeigen z. T. ähnliche Verhältnisse wie beim Ohr, weshalb wir an dieser Stelle einen kurzen Ueberblick über die einschlägige Literatur folgen lassen. Dieses Sinnesorgan eignet sich besonders, den Einfluß der in großen Höhen entstehenden allgemeinen Anoxaemie zu studieren, da rein physikalische Wirkungen des Luftdrucks unwahrscheinlich sind. Die Resultate sind aber nicht eindeutig und z. T. widersprechend.

Am eingehendsten wurde der Farbensinn untersucht. Bei der Prüfung mit pseudoisochromatischen Tafeln wurde weder von Schmid noch im Zürcher Physiologischen Institut irgend eine Störung gefunden. Die Tafeln wurden auch bei starker Herabsetzung des Luftdrucks bis in eine Höhe von 6000 m ohne Sauerstoffzufuhr fehlerlos erkannt. Fichter dagegen, der die Untersuchungen von Schmid später nachkontrollierte, spricht in seiner Arbeit von einer im Aufstieg der Höhenzunahme parallel gehenden Herabsetzung der Farbenempfindlichkeit. Uebereinstimmend stellten sowohl Schmid wie Fichter fest, daß eine bereits vorhandene Farbenasthenopie durch Sauerstoffmangel steigerungsfähig ist; auch kam es bei Normalen, die schon unter gewöhnlichen Verhältnissen eine gewisse Umstimmbarkeit des Farbensystems zeigten, in der Höhe zur eigentlichen Farbenasthenopie.

Widersprechend sind die Untersuchungsergebnisse über die Lichtempfindlichkeit, die Sehschärfe und das Auflösungsvermögen des Auges. Während Ikemune bei einem Luftdruck von 450 mm Hg in der Unterdruckkammer, entsprechend einer Höhe von allerdings nur 4000 m, keine Veränderung der absoluten Sehschärfe feststellen konnte, und auch von den Zürchern mittels Leseproben in noch grösseren Höhen normale Sehschärfe gefunden wurde, weist Mc. Farland auf eine in der Höhe zunehmende Verminderung der Lichtempfindlichkeit hin. Er benützte allerdings an Stelle der Luftdrucksenkung eine sich steigernde Verdünnung der Luft mit Stickstoff, weshalb seine Resultate nicht ohne weiteres mit den andern vergleichbar sind. In Höhe umgerechnet gibt er als Ausgangspunkt 7500 und als obere Grenze 15000 Fuß an.

Das Auflösungsvermögen des Auges fand Berger bei Spirometerversuchen mit sauerstoffarmen Luftgemischen auch bei erheblicher Herabsetzung der 0_2-Spannung sozusagen unverändert. Bei einer andern Versuchsanordnung des gleichen Autors, wo die „Helligkeitsunterschiedsempfindlichkeit H. U. E." hineinspielte, ein Faktor, dessen physiologische Korrelate hauptsächlich zentral lokalisiert sind, kam es zu einer deutlichen Herabsetzung.

In den Zürcher Versuchen aus der erwähnten unveröffentlichten Arbeit des Physiologischen Instituts wurde in geringem Umfang auch noch das Gesichtsfeld untersucht und in einer Höhe von 6000 m ohne Sauerstoffzufuhr vollständig intakt befunden. Batenko konstatierte in gleicher Höhe eine bedeutende Vergrösserung des blinden Flecks, was also doch auf eine mögliche Veränderung des Gesichtsfelds hinweist. Sauerstoffzufuhr ließ die Vergrösserung wieder auf die Norm zurückgehen, woraus gefolgert wird, daß die Anoxaemie als Hauptursache der Veränderung anzusehen sei.

Alle diese Befunde überblickend, kann man sich des Eindrucks nicht erwehren, daß noch zahlreiche Fragen hängig sind und bis zur endgültigen Beurteilung noch mehrfach

experimentell bearbeitet werden müssen, das Sehvermögen im ganzen aber auch bei bedeutender Luftdrucksenkung unverändert erhalten bleibt.

Nach diesem kurzen Ausblick in die Ophthalmologie kehren wir zu den in der Otologie bis jetzt durchgeführten Untersuchungen und unsern eigenen Resultaten zurück.

Zu den Ergebnissen von Hartmann, der in der Unterdruckkammer eine Senkung der oberen Tongrenze mit dem Monochord festgestellt hat, können wir keine bestimmte Stellung nehmen, da wir die obere Tongrenze nicht direkt bestimmt haben. Auch lassen sich nur diejenigen Werte von Hartmann mit unseren Versuchen vergleichen, die bei 6000 m aufgenommen wurden, während unsere Versuchspersonen die von Hartmann erreichten Höhen von 7000 m und 8000 m nicht ertrugen. Die von Hartmann festgestellte Herabsetzung der oberen Tongrenze bei 6000 m war nicht erheblich, sie betrug maximal bei einer der Versuchspersonen 3450 Hz, im Durchschnitt aber nur 1800 Hz. Es scheint uns trotzdem auffällig, daß die Hörkurve bis zu 8200 Hz, wie wir sie aufgenommen haben, von einer derartigen Senkung der oberen Tongrenze gar nicht berührt werden sollte. Ein gewisser Hörverlust bei den hohen Frequenzen wäre eigentlich zu erwarten. Da die Monochordbestimmungen, wie schon früher ausgeführt, schon unter normalen Umständen und sicher noch in erhöhtem Maße, wenn der Untersucher selbst unter vermindertem Luftdruck steht, ungenau sind und rein methodisch zu Zweifeln Anlaß geben, sollte die obere Tongrenze mit einem entsprechend eingerichteten Audiometer untersucht werden. Hartmann stellt die audiometrische Bearbeitung der Frage durch Dr. Clamann in Aussicht, jedoch konnten wir keine entsprechende Mitteilung finden.

Die Untersuchungen von Spiesman und Irwin sind mit unserer Arbeit nur bezüglich der Hypoxaemie vergleichbar, da die genannten Autoren mit O_2-armen Gasgemischen bei normalem Druck gearbeitet haben, während wir den Einfluß der Luftdrucksenkung, allerdings einhergehend mit O_2-Ver-

armung, untersuchten. Nach ihren Mitteilungen macht sich der Einfluß der Anoxaemie auf die Hörfähigkeit erst bei einer Senkung des Sauerstoffs im Atmungsgemisch auf 10 % bemerkbar. Stärkere Störungen kamen erst bei noch weiterer Verminderung des Sauerstoffs zum Vorschein. Da der Sauerstoffgehalt der Luft normalerweise ungefähr 20 %, also der Sauerstoffteildruck ungefähr 1/5 des Gesamtdruckes beträgt, entsprach der Sauerstoffgehalt in den Versuchen von Spiesman und Irwin im Maximum ungefähr der Hälfte des Normaldruckes oder einer Höhe von 5500 m. Bei dieser Sauerstoffverarmung setzten ihre Versuche ein und erstreckten sich über eine weitere Abnahme des Sauerstoffgehaltes, deren Endgrad aus dem uns zugänglichen Referat nicht ersichtlich ist. Sie sind aber jedenfalls bei ihrer Versuchsanordnung zu einer wesentlich höheren Hypoxaemie gelangt als wir. Bei derartigen Graden der Sauerstoffverarmung waren uns aber genaue Hörprüfungen, wie öfters betont, nicht mehr möglich, da die Stärke der zentralen Erscheinungen jede genaue Bestimmung der Schwellenwerte verunmöglichte. Aus diesem Grunde gehen die Experimente von Spiesman und Irwin und unsere eigenen auch bezüglich der Hypoxaemie aneinander vorbei.

Unsere Untersuchungen decken sich dagegen mit den Stimmgabelexperimenten russischer Autoren und des Physiologischen Institutes Zürich.

Unsere Ergebnisse zeigen eine überraschende Unabhängigkeit der Funktion des ganzen Hörapparates von einer Luftdrucksenkung bis auf den halben Normaldruck, die umso auffälliger ist, als sich mit der Luftdrucksenkung eine ganze Reihe von physikalischen und physiologischen Faktoren ändern, deren gegenseitige Kompensation sich durchaus nicht von selbst versteht. Eine theoretische Deutung der Wirkungen einer Luftverdünnung stößt gerade bei der Hörfunktion auf große Schwierigkeiten, weil hier nicht nur, wie bei den meisten anderen biologischen Prozessen, die Hypoxaemie in Frage kommt, sondern die mechanische Wirkung der Luftverdünnung

als solche in Rechnung zu setzen ist. Schon die Aenderung der rein physikalischen Faktoren ist schwer mit einiger Sicherheit quantitativ zu beurteilen, während die Aenderung der in manchen Punkten noch ungeklärten Schalleitung, die sich bis zum Cortischen Organ erstreckt, nur ganz hypothetische Erwägungen zuläßt. Mit diesem Vorbehalt werden wir versuchen, den komplizierten Fragenkomplex grundsätzlich zu zerlegen und auf die verschiedenen Möglichkeiten hinzuweisen, sind uns aber bewußt, daß nur direkte Messungen über Hypothesen hinausführen können.

Theoretisch kann die Luftdrucksenkung das Gehör auf vier verschiedenen Wegen beeinflussen, nämlich:

1. Veränderungen der auf das Trommelfell auftreffenden Schallenergie infolge veränderter Abgabe von Schallenergie durch die Schallquelle und Verminderung der Leitung derselben infolge der verminderten Dichte der schwingenden Luft, ein rein physikalisches Problem.
2. Veränderungen der Schalleitung im Schalleitungsapparat.
3. Veränderungen der Empfindlichkeit des Innenrohrs und der zentralen Nervenbahnen infolge der Anoxaemie.
4. Veränderungen in der Hirnrinde, also im Bereiche der psychischen Funktionen, ebenfalls infolge der gleichen Ursache.

Die beiden ersten Faktoren werden vorwiegend bei der Luftleitung, teilweise aber auch bei der Knochenleitung ihre Wirkung ausüben; die beiden andern Faktoren sind bei allen Versuchen gleichmäßig beteiligt.

Am einfachsten ist die Beurteilung der Knochenleitung bei offenem und geschlossenem Gehörgang. Hier fallen die störenden physikalischen Faktoren der verschlechterten Luftleitung in verdünnter Luft und wohl auch eine veränderte Tonabgabe durch den Tongenerator des Knochentelephons dahin. Auch ist der schalleitende Apparat, wenn auch nicht ganz, so doch teilweise ausgeschaltet. Die Ergebnisse erlauben daher vor allem den Einfluß auf das periphere Perzeptions-

organ, die Nervenbahnen und die Hirnrinde, also auf die Hörempfindung, festzustellen. Es ist hierbei mit Hartmann anzunehmen, daß die Wirkung des verminderten Luftdruckes auf die Abnahme des Sauerstoffgehaltes und damit auf die Hypoxaemie zurückzuführen ist.

Aus allen Versuchen geht nun, wie wir gesehen haben, einwandfrei hervor, daß die Verminderung des Luftdrucks und die damit parallel gehende Sauerstoffabnahme bis zum Eintritt bereits schwerer Störungen des zentralen Nervensystems und des Allgemeinbefindens keinen Einfluß auf die Hörempfindung auszuüben vermag. Die aufgenommenen Kurven verlaufen sowohl bei offenem, wie bei verschlossenem Gehörgang bei Normaldruck und in der Höhe identisch.

Allerdings läßt sich auch bei der Knochenleitung der physikalische Einfluß der Luftverdünnung nicht ganz ausschalten, da die Schallwellen nicht nur durch den Knochen übergeleitet werden, sondern z. T. auf cranio-tympanalem Wege zum Innenohr gelangen. Es spielen dabei sowohl die Luftschwingungen im äußern Gehörgang, wie das Luftpolster hinter dem Trommelfell eine wesentliche Rolle. Die Schallleitung kann daher auch bei Knochenleitung mit offenem und geschlossenem Gehörgang wesentlich geändert werden.

Wir haben deshalb bei der Knochenleitung mit offenem Gehörgang auch zu berücksichtigen, daß durch die Luftdrucksenkung das Mittelohr, bzw. der Schalleitungsapparat geschädigt und infolgedessen die Hörfähigkeit durch Knochenleitung gesteigert würde. Auf diese Weise könnte das Mittelohr der Verschlechterung der Hörempfindung entgegenwirken. Wie schon früher erwähnt, konnte bei vereinzelten unserer Versuchspersonen nach Verlassen der Unterdruckkammer ein meist allerdings nur geringgradiger pathologischer Trommelfellbefund erhoben werden. Doch scheint es theoretisch beinahe ausgeschlossen, daß diese Schädigung des Schalleitungsapparates sich in gleicher Ausdehnung über den ganzen Bereich der Tonreihe erstrecken könnte. Wir halten es deshalb

auch nicht für möglich, daß auf diese Weise eine völlige Kompensation in allen Frequenzen zustande käme. Auch der in der überwiegenden Mehrzahl der Versuche erhobene negative otoskopische Befund spricht gegen diese Annahme, weshalb wir diesen Einwand als nicht stichhaltig betrachten. Eine Bestätigung sind in einem gewissen Sinne die Versuche mit verschlossenem Gehörgang.

Mit einigem Vorbehalt bedeuten diese Ergebnisse bei Knochenleitung, daß die Senkung des Luftdruckes innerhalb der untersuchten Grenzen keine Abnahme der Hörempfindung mit sich bringt, also sowohl das periphere Perzeptionsorgan, wie der Hörnerv, die zentralen Hörbahnen und die Hirnrinde ihre volle Funktionstüchtigkeit beibehalten.

Bei der Luftleitung kommt das physikalische Problem der Energieabgabe durch den Tongenerator, der Uebertragung der Energie durch die verminderte Luftdichte und der Energieaufnahme durch das Ohr hinzu. Die Leitung der Schallenergie ist direkt proportional der Dichte des schwingenden Mediums, die Uebertragung der Schallintensität in verdünnter Luft also erschwert. Die von einer konstanten Tonquelle ausgehenden longitudinalen Schallwellen treffen das Trommelfell in der Höhe bei verminderter Luftdichte mit einer geringeren Schwingungsenergie als bei Normaldruck, und es wäre deshalb nach den physikalischen Voraussetzungen ein Anstieg des Schwellenwertes zu erwarten; d. h. ein Ton, der bei Normaldruck bei 15 Decibels noch wahrgenommen wird, sollte bei halbem Luftdruck das Doppelte seiner Tonintensität besitzen, um noch erkannt zu werden. Es ist deshalb höchst verwunderlich, daß diese physikalisch-technische Forderung in unsern Kurven gar nicht zum Ausdruck kommt, trotzdem in einer Höhe von 6000 m z. B. bei einem durchschnittlichen Barometerstand von 350 mm die Luftdichte um die Hälfte reduziert ist. Eine abschließende Erklärung für dieses Verhalten können wir nicht geben. Es wäre einesteils denkbar, daß mit

fortschreitender Verdünnung der Luft auch die Energieabgabe der schwingenden Telephonmembran erleichtert wird, ähnlich wie bei der Stimmgabel die Dämpfung kleiner wird. Allerdings trifft dies nach den Angaben der das Telephon konstruierenden Firma nicht zu. Es wird von ihr eine konstante Energieabgabe unter jedem Druck angenommen. Eine direkte Messung der Schwingungsamplituden unter verschiedenen Drucken haben wir jedoch nicht durchgeführt. Sollten diese bestätigen, daß das Telephon bei vermindertem Luftdruck dieselbe Energie abgibt wie bei Normaldruck, so müßte die auf das Trommelfell auftreffende Energie proportional dem sinkenden Luftdruck abnehmen. Eine trotzdem gleichbleibende Hörfähigkeit ließe sich in diesem Falle nur durch kompensatorische Einrichtungen des Schalleitungsapparates erklären, durch welche die Schalleitung verbessert und daher dem Innenohr ein prozentual größerer Anteil der am Trommelfell auftreffenden Energie zugeführt würde. Auf diese Weise würde der Perzeptionsapparat dieselbe Energiemenge, wie unter normalem Luftdruck erhalten. Diese Erklärung hat infolge der geschilderten sehr genauen Uebereinstimmung der Hörkurven bei Normaldruck und Unterdruck eine erhebliche Wahrscheinlichkeit, da sonst eine genaue Proportionalität der Zunahme der Energieabgabe des Telephons über die sämtlichen Frequenzen angenommen werden müßte, was wenig wahrscheinlich ist.

Das Gehörorgan verfügt bekanntlich über eine ganze Reihe regulatorischer Möglichkeiten, die es in mechanisch-akustischer Beziehung von äußeren Einflüssen weitgehend unabhängig machen (Lüscher). Es wäre beispielsweise denkbar, daß die Dämpfung durch das hinter dem Trommelfell liegende, für die Schallüberleitung wichtige Luftpolster bei abnehmender Luftdichte abnehmen würde und sich dadurch die Luftleitung verbessern könnte. Auch kommt der Tonus der Binnenohrmuskeln für eine erleichterte Schwingungsfähigkeit der Schallleitungskette in Frage. Die Probleme sind jedoch theoretisch

infolge ihrer Kompliziertheit nur aufzuwerfen, nicht aber zu lösen. Sie bedürfen einer direkten experimentellen Bearbeitung.

Zusammenfassend geht aus unseren Ergebnissen bei Luftleitung hervor, daß offenbar der Schalleitungsapparat selbst hochgradige Luftdruckschwankungen über alle untersuchten Frequenzen genau kompensiert und aus den Resultaten bei Knochenleitung, daß der Schallempfindungsapparat gegenüber Sauerstoffmangel bedeutend weniger empfindlich ist als das Zentralnervensystem. Wie sich aus dem Schrifttum ergibt, gilt dies auch für das Auge.

Das Ohr besitzt demnach unter den Luftdruckschwankungen, denen der Mensch normalerweise auf den noch erträglichen Höhen der Erde und auch beim Passagierflug ausgesetzt ist, eine praktisch konstante Empfindlichkeit. Viel früher als das periphere Sinnesorgan wird das zentrale Nervensystem in Mitleidenschaft gezogen, sodaß praktisch eine Beeinträchtigung der Hörfähigkeit überhaupt nicht in Frage kommt. Hören und Sehen vergehen erst plötzlich mit dem Schwinden der Sinne überhaupt.

Zum Schluß bleibt mir die angenehme Pflicht, Herrn Prof. E. Lüscher für seine Anleitungen und seine Unterstützung bei der Durchführung der Arbeit meinen größten Dank auszusprechen. Danken möchte ich auch Herrn Prof. A. Brückner für seine Winke bei der Durchsicht der ophthalmologischen Literatur.

Literatur-Verzeichnis.

Batenko P. M. und E. M. Belostochij, Ref. Zbl. Ophthalm. 43, S. 468 (1939).

Berger C. und O. Boye, Ref. Zbl. Ophthalm. 40, S. 211 (1938).

Casella B., Ref. Zbl. Hals- usw. Heilk. 31, S. 226, 468 (1939).

Fichter H., Ref. Zbl. Ophthalm. 46, S. 559 (1941).

Hartmann H., Die obere Hörgrenze bei Sauerstoffmangel, Luftf. med. 1, S. 192 (1936).

Hirano Yuzzaburo, Ref. Zbl. Hals- usw. Heilk. 31, S. 86 (1939).

Huzisawa Hideho, Ref. Zbl. Hals- usw. Heilk. 31, S. 625 (1939).

Kawana Tatuo, Ref. Zbl. Hals- usw. Heilk. 32, S. 43 (1939).

Jkemune Studi, Ref. Zbl. Ophthalm. 46, S. 233 (1941).

Kisil'stein Ia. A., Ref. Zbl. Hals- usw. Heilk. 34, S. 151 (1941).

Loewy A., Physiologie des Höhenklimas, Berlin 1932.

Lüscher E., Ueber Regulationsmechanismen des Gehörorganes, Schweiz. med. Wschr. 1941, 12, S. 687. Die Audiometrie, Schweiz. med. Wschr. 1942, 12, S. 325.

Mc. Farland, Ross A. and John Evans, Ref. Zbl. Ophthalm. 44, S. 287 (1940).

Popow A. P., Zbl. Hals- usw. Heilk. 32, S. 531 (1939).

Puchal'skij A. A., Ref. Zbl. Hals- usw. Heilk. 34, S. 609 (1941).

Schmid J., Zbl. Ophthalm. 40, 12 (1938).

Spiesman Irwin G., Ref. Zbl. Hals- usw. Heilk. 27, S. 575 (1937).

Toyoschima Yutaka, Ref. Zbl. Hals- usw. Heilk. 34, S. 92, 94 (1941).

Waetzmann E., Ueber die Empfindlichkeit des menschlichen Ohres. Festschr. Techn. Hochsch. Breslau 1910—1935, S. 478 (1935).